

8. Перегудова Т. В., Разников В. В. Построение сглаживающего сплайна для экспериментальной кривой на ЭВМ СМ-3 // АН СССР, ОИХФ.— Препр.— Черноголовка. 1985.
 9. Blair D. W. AJAA J., 1970, 8, 8, 1439.
 10. Глазкова А. П. Катализ горения взрывчатых веществ.— М.: Наука, 1976.

Поступила в редакцию 28/IX 1987,
 после доработки — 24/VI 1988

УДК 532.52 : 662.61

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ СМЕСИ ГАЗА С ГОРЯЩИМИ ЧАСТИЦАМИ МЕТАЛЛА В ПОЛУЗАМКНУТОМ КАНАЛЕ

В. Н. Виллюнов, А. Б. Ворожцов, Ю. В. Феценко
 (Томск)

Рассмотрим полузамкнутый канал конденсированного вещества (к-вещества), горящего по боковой поверхности S_i с массовой скоростью \dot{m}_i и тепловым эффектом Q_i (рис. 1). Продукты сгорания содержат дисперсную фазу в виде непрореагировавшего металла. Истекают продукты сгорания через правую границу при $x/L = 1$. Известно, что полнота сгорания к-веществ, содержащих частицы металла, в большой степени определяется временем химического реагирования последних и функционально связана с временем пребывания продуктов сгорания в канале $\tau_{пр}$. Если за время пребывания частицы металла не успевают догорать, то изменяются параметры состояния двухфазной среды в канале и характеристики истечения.

Для полного сгорания частиц металла необходимо, чтобы $\tau_{пр} \geq \tau_*$, где τ_* — время полного сгорания частиц. Макрокинетика процесса основывается на привлечении эмпирического закона скорости горения индивидуальной частицы [1] и осложняется агломерацией частиц на поверхности конденсированного вещества [1—3], переменностью концентрации окисляющих реагентов в активной среде, скоростным и тепловым запаздыванием частиц, их динамическим взаимодействием [4] и т. д. Учет всех перечисленных выше факторов при определении $\tau_{пр}$ сложен, и часто, особенно при качественных оценках, оно определяется весьма приблизительно или равным времени релаксации свободного объема канала, или рассчитывается при существенных допущениях [5], что снижает достоверность получаемой в расчетах величины полноты сгорания к-вещества. Внутренние двухфазные течения в условиях скоростной и температурной неравновесности хорошо изучены [6, 7]. Детальных исследований движения реагирующей газовой смеси значительно меньше (см., например, [8]).

В настоящей работе рассмотрены модель и результаты расчетов двухфазного полидисперсного течения газа с горящими частицами металла в полузамкнутом канале при скоростной и температурной неравновесности частиц и предложен метод для прогнозирования полноты сгорания к-вещества. Приняты следующие допущения:

- 1) частицы, поступающие с поверхности к-вещества, образуют полидисперсную систему N фракций. Функция распределения массы дисперсной фазы по размерам частиц предполагается заданной;
- 2) частицы представляют собой конгломерат металл/окисел в виде «ореха», где «скорлупа» — жидкий окисел, а «ядро» — жидкий металл.

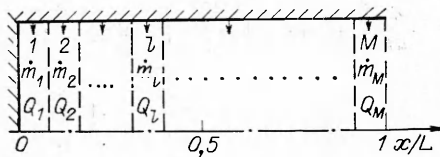


Рис. 1. Область решения.

Начальное соотношение между металлом и окислом предполагается известным;

3) неизотермическое течение гетерогенной смеси в канале рассматривается как движение двух взаимодействующих и взаимопроникающих сред [9];

4) совокупность сил, действующих на частицу в потоке, ограничивается силами давления и трения, а обмен энергией определяется работой аэродинамических сил и теплообменом;

5) коагуляция и дробление частиц не учитываются;

6) часть образовавшейся в процессе горения металла окиси (κ) остается на частице, а остальная часть ($1 - \kappa$) в виде мелкодисперсных капель находится в тепловом и динамическом равновесии с газом. Вследствие малой объемной концентрации мелкодисперсной фазы ее присутствие не влияет на плотность газа.

Законы движения идеального сжимаемого газа и потока частиц в интегральной форме определяются следующими уравнениями:

$$\frac{d}{dt} \int_W \rho dW + \int_S \rho V_n dS = \int_{S_l} (1 - z_l) \dot{m}_l dS_l$$

— сохранения массы (газа);

$$\frac{d}{dt} \int_W \rho a_k dW + \int_S \rho a_k V_n dS = \int_{S_l} (1 - z_l) \dot{m}_l a_{kl} dS_l$$

— изменения концентрации окисляющих реагентов;

$$\frac{d}{dt} \int_W \rho \vec{V} dW + \int_S \rho \vec{V} V_n dS + \sum_i^N \int_W \rho_{si} \vec{f}_i dW = 0$$

— сохранения количества движения (газа);

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_W \rho E dW + \int_{S_l} (\rho E + p) V_n dS = \int_{S_l} (1 - z_l) \dot{m}_l Q_l dS_l - \\ - \sum_i^N \int_W \rho_{si} (\vec{V}_{si} \vec{f}_i + q_i) dW \end{aligned}$$

— сохранения энергии (газа);

$$\frac{d}{dt} \int_W \rho_{si} dW + \int_S \rho_{si} V_{sin} dS = \int_{S_l} z_l \dot{m}_l h_i dS_l$$

— сохранения массы (частиц);

$$\frac{d}{dt} \int_W \rho_{si} D_i^3 dW + \int_{S_l} \rho_{si} D_i^3 V_{sin} dS = \int_{S_l} z_l D_{il}^3 \dot{m}_l h_i dS_l$$

— изменения концентрации металла;

$$\frac{d}{dt} \int_W \rho_{is} \vec{V}_{si} dW + \int_S \rho_{is} \vec{V}_{si} V_{sin} dS - \int_W \rho_{si} \vec{f}_i dW = 0$$

— сохранения количества движения (частиц);

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_W \rho_{si} \left(e_{si} + \frac{\vec{V}_{si}^2}{2} \right) dW + \int_S \rho_{si} \left(e_{si} + \frac{\vec{V}_{si}^2}{2} \right) V_{sin} dS = \int_{S_l} z_l e_{si} \dot{m}_l h_i dS_l + \\ + \int_W \rho_{si} (\vec{V}_{si} \vec{f}_i + q_i) dW \end{aligned}$$

— сохранения энергии (частиц). Здесь $i = 1, \dots, N$ — число фракций;

$l = 1, \dots, M$ — число расчетных ячеек по длине капала; ρ — плотность газа; ρ_{si} — плотность «газа» частиц i -й фракции; p — давление газа; \vec{V} — вектор скорости газа; \vec{V}_{si} — вектор скорости «газа» частиц i -й фракции; V_n — нормальная составляющая вектора скорости газа; V_{sin} — нормальная составляющая вектора скорости «газа» частиц i -й фракции; W — объем; S — площадь проходного сечения канала; S_l — площадь поверхности канала; z_i — доля частиц в продуктах сгорания конденсированного вещества; D_i — диаметр металлического «ядра» частицы i -й фракции; h_i — доля частиц i -й фракции в потоке частиц; a_k — концентрация окисляющих реагентов.

Динамическое и тепловое взаимодействие фаз описывается следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \vec{f}_i &= \frac{3}{4} \frac{\rho}{\rho_b} \frac{(\vec{V} - \vec{V}_{si}) |V - V_{si}|}{d_i} c_{Di}, \\ c_{Di} &= \left(\frac{24}{\text{Re}_i} \right) (1 + 0,125 \text{Re}_i^{0,72}), \quad \text{Re}_i = \frac{\rho d_i |V - V_{si}|}{\mu}, \\ q_i &= - \frac{6\alpha_i}{\rho_b d_i} (T_{si} - T), \quad \alpha_i = \frac{\lambda}{d_i} (2 + 0,459 \text{Re}_i^{0,55} \text{Pr}^{0,33}), \end{aligned} \quad (1)$$

где d_i — диаметр частицы i -й фракции; ρ_b — плотность вещества частицы; μ — вязкость газа; T — температура газа; T_{si} — температура частиц; λ — теплопроводность газа; Pr — число Прандтля.

Текущий диаметр металлического «ядра» частицы определяется с помощью уравнения выгорания [1]

$$\begin{aligned} \frac{dD_{il}}{dt} &= \frac{1}{670 b} \frac{a_k^{0,9}}{(10^6 D_{il})^{b-1}}, \\ b &= \begin{cases} 1,5 & \text{при } p \geq 2,5 \text{ МПа,} \\ 2 & \text{при } p \leq 2,5 \text{ МПа.} \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

Система уравнений (1) замыкается следующими соотношениями:

$$J = RT \frac{1}{\gamma - 1}, \quad E = J + \frac{|\vec{V}|^2}{2}, \quad e_{si} = c_v T_{si},$$

где J — удельная внутренняя энергия газа; E — удельная полная энергия газа; e_{si} — удельная внутренняя энергия частиц; c_v — теплоемкость вещества частицы; γ — показатель адиабаты; R — газовая постоянная. Полнота сгорания металла в каком-либо сечении канала определяется следующей естественной зависимостью:

$$\varphi = 1 - \sum_{i=1}^N h_i \left(\frac{D_i}{d_i} \right)^3. \quad (3)$$

Разностная аппроксимация уравнений (1) для интегрирования по методу крупных частиц строится известным образом [10]. В этой же работе приведены рекомендации по реализации численного алгоритма.

Рассмотрим результаты расчета одномерного полидисперсного течения газа с горящими частицами $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ в канале (см. рис. 1) с отношением ширины к длине $H/L = 0,1$. Массовая скорость горения \dot{m}_l является функцией давления, линейно уменьшаясь по длине канала от 25 кг/(м²·с) при $x/L = 0$ до 20 кг/(м²·с) при $x/L = 1$. Температура поступающих в канал продуктов сгорания (газа и частиц) T_p определяется из термодинамического расчета при пренебрежении их кинетической энергией и всеми видами теплопотерь. Концентрация окисляющих реагентов в поступающих с поверхности газах $a_{kl} = 50\%$. Рассматриваются два варианта значений процентного содержания частиц $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ на поверхности к-вещества: $z_l = 12$ и 22%. Частицы в каждом из вариантов представлены пятью фракциями со следующими массовыми

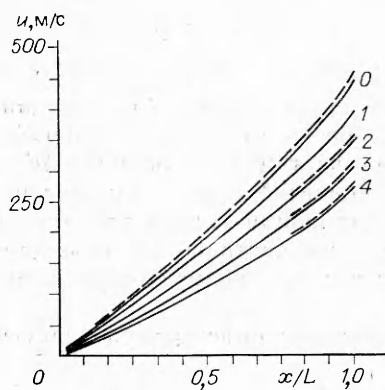


Рис. 2. Распределение скоростей по длине канала для $z_i = 12$ (---) и $z_i = 22$ % (—).

долями: 1) 20 мкм — 60 %; 2) 50 мкм — 10 %; 3) 100 мкм — 10 %; 4) 150 мкм — 10 %; 5) 200 мкм — 10 %.

Частицы первой фракции полностью состоят из окиси алюминия, а в остальных фракциях доля непрореагировавшего металла составляет 25 %. Доля оседающей на частице в процессе ее горения окиси κ полагается равной 0,3. На рис. 2 представлены распределения скоростей газа (0) и частиц первых четырех фракций по длине канала. За счет увеличения градиента скорости разность между скоростями газа и частиц каждой фракции увеличивается по длине канала, и тем больше, чем больше размер частиц. Рис. 3 иллюстрирует влияние размера частиц на степень температурной неравновесности двухфазного потока. Здесь прослеживается взаимовлияние газа и частиц. Газ, ускоряясь при увеличении x/L , остывает и при этом охлаждает поступающие с боковой поверхности частицы, имеющие температуру T_p . При росте $(V - V_{si})$ и $(T_{si} - T)$ возрастает теплообмен, чем и объясняется смена знака второй производной функции температуры газа от относительной длины канала $T(x/L)$ при $x/L = 0,92 \div 0,94$. Смену знака второй производной можно проследить и у зависимостей температур частиц фракций 1 и 2. Частицы фракций 3, 4 имеют большую массу, поэтому функции $T_{s3}(x/L)$ и $T_{s4}(x/L)$ заметно более гладкие.

Анализ зависимости полноты сгорания Al, содержащегося в частицах, поступающих в поток с различных участков длины канала $\varphi_i(x/L)$, представленной на рис. 4, позволяет определить границу, начиная с которой частицы соответствующих фракций, поступающие в поток далее

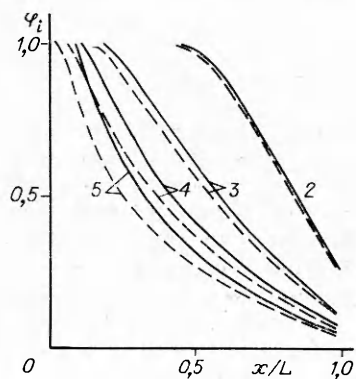


Рис. 4. Зависимость полноты сгорания Al при $z_i = 12$ % (---), $z_i = 22$ % (—).

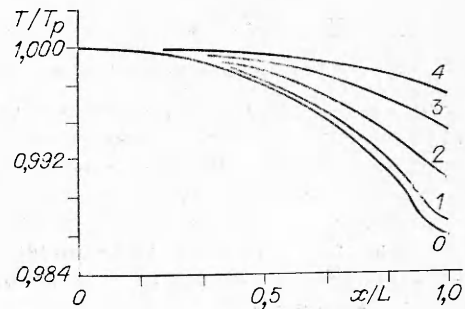


Рис. 3. Среднемассовая температура частиц фракций 1—4 и газа (0) по длине канала.

Рис. 5. Зависимость $(\tau_{*i}/\tau_{*pi})(x/L)$.

по длине, вносят свой вклад в суммарное уменьшение полноты сгорания. Вследствие обратного влияния частиц на газ (см. рис. 2) увеличение массовой доли частиц в потоке при незначительном содержании металла (в данном случае до 2—3 % от общей массы продуктов сгорания) повышает общую полноту сгорания металла, поскольку относительное содержание окисляющих реагентов меняется незначительно.

На рис. 5 приведена зависимость отношения времени сгорания частиц к времени пребывания их в канале от относительной координаты, откуда частицы начинают свое движение. При $\tau_{*i}/\tau_{прi} \leq 1$ частицы полностью сгорают. Резкий рост зависимости в конце канала при $x/L \rightarrow 1$ и в большей степени для частиц больших размеров объясняется нелинейностью $\tau_{*}(x/L)$ и ускорением потока. Суммарная полнота сгорания $\phi = 0,995$.

Таким образом, в данной работе предложена численная методика, позволяющая проводить расчеты двухфазного течения смеси газа с горящими частицами металла. На модельном примере показаны количественные оценки скоростной и температурной неравновесности при определении времени пребывания полидисперсных частиц металла в полузамкнутом канале и полноты их сгорания. Исследовано влияние концентрации и размеров частиц. Установлена роль обратного влияния частиц на газ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Похил П. Ф., Беляев А. Ф., Фролов Ю. В. и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах.— М.: Наука, 1972.
2. Бабук В. А., Белов В. П., Ходосов В. В. и др. ФГВ, 1985, 21, 3, 20.
3. Григорьев В. Г., Куценогий К. П., Зарко В. Е. ФГВ, 1981, 17, 4, 3.
4. Стернин Л. Е., Маслов Б. Н., Шрайбер А. А. и др. Двухфазные моно- и полидисперсные течения газа с частицами.— М.: Машиностроение, 1980.
5. Гусаченко Л. К. ФГВ, 1981, 17, 1, 140.
6. Яненко И. И., Солоухин Р. И., Папырин А. И. и др. Сверхзвуковые двухфазные течения в условиях скоростной неравновесности частиц.— Новосибирск: Наука, 1980.
7. Васенин И. М., Архипов В. А. и др. Газовая динамика двухфазных течений в соплах.— Томск: Изд-во ТГУ, 1986.
8. Медведев А. Е., Федоров А. В., Фомин В. М. ФГВ, 1984, 20, 2, 3.
9. Нигматулин Р. И. Основы механики гетерогенных сред.— М.: Наука, 1978.
10. Белоцерковский О. М., Давыдов Ю. М. Метод крупных частиц в газовой динамике.— М.: Наука, 1982.

Поступила в редакцию 15/IX 1987,
после доработки — 15/XII 1987

УДК 536.462

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ПЛАЗМООБРАЗУЮЩЕГО ТОПЛИВА

*Ю. П. Бабаков, Ю. С. Иващенко, В. А. Новиков,
А. Л. Садырин, С. И. Яковлев
(Люберцы, Красноярск)*

Одна из особенностей плазмообразующих топлив, продукты сгорания которых используются в качестве рабочего тела импульсных геофизических МГД-генераторов [1], состоит в наличии ионизирующейся присадки (обычно нитратов цезия и калия [2]), которая обеспечивает требуемый уровень электропроводности продуктов сгорания. В работе [3] высказана гипотеза о диспергировании такой присадки с поверхности горения плазмообразующего топлива в виде расплавленных частиц (капель). В этом случае возможно объяснение эффекта снижения уровня электропроводности продуктов сгорания по сравнению с расчетным за счет незавер-